

Préparation à l'agrégation de Sciences-Physiques ENS Physique

Physique pour les chimistes - Phénomènes de
transport et machines thermiques

I) Phénomènes de transport – Expériences qualitatives

1) Diffusion thermique

On dispose pour cette expérience de l'étoile des métaux possédant quatre branches constituées de métaux différents (Al, Cu, Fe, Zn).

Le principe de l'expérience est de placer quatre morceaux de paraffine identiques dans les creusets des différentes branches et une bougie allumée au centre, sous l'étoile. Les morceaux de paraffine vont alors fondre à des moments différents dépendant du métal de la branche où ils sont posés. En relevant les différents instants de fusion de la paraffine, on peut alors classer les différents métaux selon leur diffusivité thermique. On peut même obtenir des ordres de grandeur de la diffusivité thermique, ou de leurs ratios si les morceaux de paraffine sont suffisamment proches.

On donne ici la diffusivité thermique des différents métaux :

- Aluminium : $D = 99.10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
- Cuivre : $D = 117.10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
- Fer : $D = 23.10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
- Zinc : $D = 44.10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

Expérience : Placer les quatre morceaux de paraffine identiques dans les creusets, et placer la bougie allumée sous l'étoile en déclenchant un chronomètre. Relever les instants correspondant à la fusion des morceaux de paraffine en fonction du métal où ils étaient situés.

Votre expérience est-elle cohérente avec les données ?

Bien penser à retirer la paraffine après usage, sans gratter mais en la retirant avec un papier absorbant humidifié quand elle est encore liquide.

2) Diffusion particulière

Préparer une boîte de Petri avec de l'Agar-Agar et injecter une goutte d'encre au centre avec une seringue. Observer la diffusion de la tache d'encre au sein du gel d'Agar-Agar. Attention, la vitesse de diffusion dépend fortement de la préparation du gel en amont, mais se fait sur des échelles de temps de l'ordre de l'heure.

3) Convection

On dispose pour cette expérience de deux tubes reliés par deux tiges permettant la circulation de fluide de l'un à l'autre. Commencer par bien les relier et **vérifier leur étanchéité avec de l'eau froide sans colorant.**

On prépare ensuite une solution d'eau à température ambiante que l'on colorera très légèrement en bleu (2-3 gouttes de colorant devraient suffire) et une solution d'eau plus chaude (de température de l'ordre de 40 C, ce n'est pas la peine d'avoir recours à des températures plus élevées) que l'on colorera légèrement en rouge. Il faut alors placer en même temps la première solution dans le tube de gauche et la seconde dans le tube de droite afin que tout ne se mélange pas dès le début. Si des bulles d'air se sont formées au sein des tiges centrales et empêchent la circulation de liquide, ne pas hésiter à pencher légèrement le dispositif, la convection devrait alors rapidement s'installer. On peut alors observer le phénomène de convection directement avec le liquide chaud (rouge) passant par la tige supérieure et le liquide froid (bleu) passant par la tige inférieure.



FIG. 1 – Observation du déplacement des fluides chaud (rouge) et froid (bleu) avec une situation initiale où le fluide chaud était entièrement à gauche et le fluide froid entièrement à droite

On peut enfin boucher les deux tubes avec les bouchons percés et suivre l'évolution de la température en y plaçant deux thermocouples jusqu'à homogénéisation.

Une autre possibilité est d'utiliser trois tubes et d'essayer d'observer deux cellules de convection.

4) Rayonnement

On se propose ici d'illustrer les transferts thermiques par rayonnement en comparant deux systèmes presque identiques si ce n'est que l'un absorbe mieux le rayonnement que l'autre.

On place deux tubes à essai identiques (utiliser des potences et des pinces plates), l'une peinte en noir et l'autre peinte en blanc (ou avec une peinture métallisée) à distances égales d'une lampe quartz-iode avec condenseur. Il faut bien choisir le condenseur pour que le faisceau soit le plus parallèle possible, et qu'il éclaire suffisamment et de manière identique les deux tubes. Mesurer la température à l'intérieur des deux tubes, un écart en température devrait être observable après quelques minutes. Est-il cohérent avec les peintures utilisées ?

II) Phénomènes de transport – Expériences quantitatives

1) Mesure de la conductivité thermique du cuivre

Référence : Notice + Donnini & Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique et applications (à l'entrée "Conduction thermique")

On dispose d'un montage contenant un barreau de cuivre dont la température est fixée à une extrémité par une circulation d'eau, et qui est chauffé à l'autre extrémité par une résistance de puissance de 47 Ω . Deux résistances de platine sont insérées dans le barreau, distantes de 100 mm, et permettent de mesurer la température en ces deux points (consultez les tables de conversion température-résistance).

a) Mesures

- Alimenter la résistance avec une tension constante : mesurer qualitativement la durée d'établissement du régime stationnaire et relever les deux températures associées.

- Répéter cette expérience pour plusieurs valeurs de puissances.

b) Exploitation des données

- En traçant la différence de température en fonction de la puissance, définir puis mesurer la résistance thermique du barreau entre les deux sondes.
- Pour cette géométrie, rappeler l'expression de la résistance thermique en fonction de la longueur, de la surface et de la capacité thermique massique de ce cylindre, puis en déduire la conductivité thermique λ du cuivre (environ $390 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).
- Enfin, à l'aide de cette valeur, calculer le coefficient de diffusion thermique du cuivre et retrouver l'ordre de grandeur de la durée d'établissement du régime stationnaire.

2) Mesure du coefficient de diffusion du glycérol dans l'eau (Facultatif, long et plus difficile)

Cette expérience peut être lancée en parallèle des autres pour gagner du temps.

a) Principe

Référence : Notice + Donnini & Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique et applications (à l'entrée "Transport (phénomènes de)")

Cette première expérience met en évidence le phénomène de diffusion moléculaire et permet la mesure d'un coefficient de diffusion. Elle consiste à étudier le mélange d'une couche de glycérol déposée initialement en dessous d'une couche d'eau, à l'aide d'une méthode optique. En effet, l'eau et le glycérol ayant des indices optiques différents, la diffusion de l'un dans l'autre crée un gradient d'indice dans la zone de mélange, ce qui dévie les rayons lumineux comme dans un mirage. Ainsi, on exploite la déviation d'un faisceau lumineux dans cette cuve pour mesurer la diffusivité du glycérol dans l'eau.

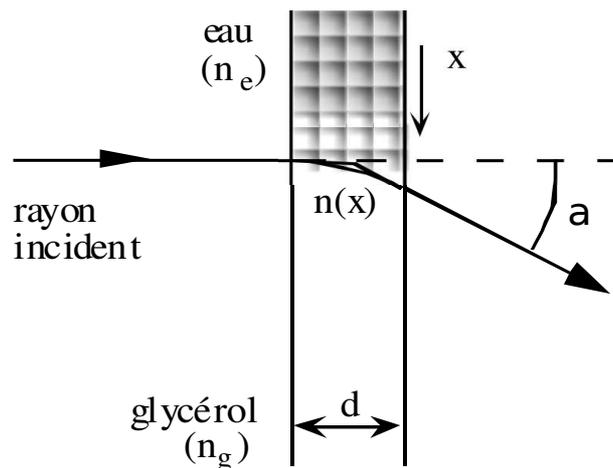


FIG. 2 – Déviation d'un faisceau lumineux dans un gradient d'indice

Les lois de l'optique dans un milieu d'indice inhomogène permettent de montrer que $\alpha = d \frac{dn}{dx}$, où d est l'épaisseur de la cuve et $\frac{dn}{dx}$ le gradient d'indice au point de traversée du rayon lumineux.

Cette formule est valable si la déviation α du rayon est petite. Par ailleurs la concentration $c(x, t)$ de glycérol est solution de l'équation de diffusion, $\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$, où D est le coefficient de diffusion. On peut résoudre cette équation en supposant qu'à l'instant initial $t = 0$ la diffusion n'a pas commencée, on a donc $c = 0$ pour $x < 0$ (dans l'eau) et c constant positif pour $x > 0$. En supposant de plus que l'indice optique est une fonction linéaire de la concentration de glycérol dans l'eau, le résultat du calcul est que la déviation angulaire maximum vaut, en fonction du temps :

$$\alpha_{\max}(t) = \frac{C_0(n_g - n_e)d}{2\sqrt{\pi Dt}},$$

et se produit en $x = 0$, c'est-à-dire au point où se situe initialement l'interface entre les deux liquides. n_g et n_e désignent les indices optiques du glycérol pur et de l'eau, et C_0 la fraction volumique du glycérol dans le mélange eau-glycérol utilisé.

Remarque : la formule rapportée dans le Quaranta est légèrement différente (et fautive), et remplace $\sqrt{\pi} \simeq 1.77$ par $2\sqrt{\ln(2)} \simeq 1.66$, sans conséquence pour l'étude.

b) Réalisation de l'expérience

Élargir un faisceau laser avec une lentille cylindrique pour réaliser une nappe, inclinée à 45° par rapport aux côtés de la cuve. On fera les observations sur un écran recouvert d'un papier millimétré situé à environ 50 cm de la cuve.

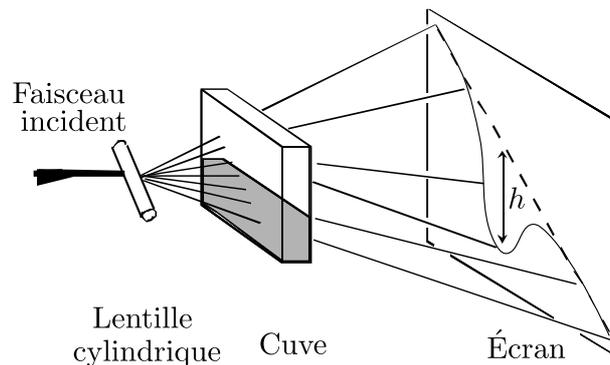


FIG. 3 – Schéma de la déviation du faisceau laser

Quand la cuve est vide, la trace de la nappe sur l'écran est une ligne inclinée à 45° (trait pointillé sur la figure ci-dessus). Repérer cette trace sur le papier.

Remplir à moitié d'eau, puis verser doucement le mélange eau-glycérol dans le fond de la cuve à l'aide de la burette. L'extrémité de la burette doit être sur le côté de la cuve et plonger jusqu'au fond pour limiter au maximum le mélange des deux liquides par convection. La nappe laser est alors fortement déformée : l'allure de la trace sur l'écran est indiquée en trait gras sur la figure.

c) Précautions

- être sûr que tout est prêt avant de verser le glycérol : la diffusion est un phénomène irréversible ! En cas de fausse manœuvre, il faut tout recommencer après avoir bien nettoyé la cuve.
- purger la burette
- ne pas secouer la cuve pendant l'expérience (il ne faut surtout pas essayer d'enlever la burette après avoir versé le glycérol)

- utiliser un mélange eau-glycérol (50-50) que du glycérol pur, dont l'indice est trop différent de celui de l'eau ; la déviation est alors très importante et on sort du domaine de validité des formules ci-dessus. Si on utilise un mélange, celui-ci doit être bien homogène.

Relever la déflexion maximum $h_{\max}(t)$ en fonction du temps ; il est souhaitable de prendre des points pendant au moins une vingtaine de minutes. Si l'écran est à la distance L de la cuve, en supposant l'angle de déviation faible on a $h_{\max}(t) = L\alpha_{\max}(t)$.

Pour déduire de ces mesures le coefficient de diffusion D il est judicieux de tracer $1/h_{\max}^2(t)$ en fonction du temps. Le calcul conduit en effet, avec $C_0 = 0.5$, à

$$\frac{1}{h_{\max}^2(t)} = \frac{4\pi}{(C_0 L d(n_{g,\text{pur}} - n_e))^2} D t = \frac{16\pi}{(L d(n_{g,\text{dilue}} - n_e))^2} D t ,$$

D s'obtient donc à partir de la pente de cette droite. Par ailleurs on s'affranchit ainsi du problème de la définition de l'origine des temps, qui ne modifie ainsi que l'ordonnée à l'origine.

Indice de l'eau $n_e = 1,33$, du glycérol pur $n_g = 1,47$. Coefficient de diffusion $D \approx 4.0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

III) Machines thermiques – le moteur de Stirling

Référence : Notice. Pour plus d'informations sur le cycle de Stirling (calcul du rendement, etc.), cf. Michel, Raoux, Tondelier & Van Brackel, Physique PCSI.

Le moteur de Stirling est un moteur thermique exploitant une différence de températures entre deux thermostats. Bien que le cycle de Stirling soit irréversible, son rendement est relativement proche de celui de Carnot. Le cycle de Stirling est composé de quatre transformations :

- d'une détente isotherme
- d'un refroidissement isochore
- d'une compression isotherme
- d'un chauffage isochore

Repérez ces quatre étapes lors de la rotation du moteur. Le moteur mis à votre disposition ne reproduit cependant pas fidèlement ce cycle à cause des contraintes liées au mouvements de la bielle, et parce que la diffusion thermique opère rapidement au sein du verre : après une dizaine de minutes, la source froide ne l'est plus.

1) Prise en main du dispositif

Le moteur possède un ensemble de capteurs utiles pour caractériser son fonctionnement :

- un potentiomètre variable solidaire du piston et caractérisant son déplacement ;
- un embout permettant la connexion d'un manomètre pour connaître la pression de l'air dans le moteur au cours du cycle ;
- un mécanisme d'entraînement d'un moteur électrique ;
- deux ancras thermiques métalliques pour mesurer les températures des sources chaudes et froides ;

1. Commencer par mesurer à l'oscilloscope la tension aux bornes du potentiomètre, préalablement alimenté à ses extrémités, puis déterminer le facteur de conversion entre tension et volume.

2. Ensuite, relier le manomètre au moteur de Stirling, puis visualiser le signal à l'oscilloscope, de même, trouver le facteur de conversion entre tension et pression. On peut dès maintenant suivre l'état

du gaz dans le diagramme de Clapeyron (pression en fonction de volume massique) en utilisant le mode X-Y.

3. Insérer des thermocouples dans les deux embouts métalliques, de manière à pouvoir à tout instant mesurer les températures des sources chaudes et froides.

4. Faites tourner rapidement le moteur à l'aide d'un moteur électrique et attendre quelques minutes. Toucher les deux embouts métalliques, que constatez-vous ? Retirer le moteur pour la suite de l'étude.

2) Utilisation avec une source de chaleur

Vérifier la présence d'éthanol dans le brûleur, puis peser ce dernier, le disposer sous le cylindre, allumer la mèche et démarrer un chronomètre. A partir de là, il faut être rapide : après quelques minutes, le moteur de Stirling sera en état de fonctionnement, après quelques dizaines de minutes, tout le verre sera chaud et il ne débitera plus une puissance suffisante pour entretenir son mouvement.

Lorsque le moteur de Stirling est prêt, le faire démarrer en initiant une rotation dans le bon sens. Ensuite, mesurer la fréquence puis observer le cycle dans le diagramme de Clapeyron sur l'oscilloscope (se mettre en mode X-Y et ajouter si nécessaire une persistance). Enfin, éteindre la flamme, arrêter le chronomètre puis peser de nouveau le brûleur (attention, c'est chaud !)

On peut alors faire les mesures suivantes :

- Déterminer grossièrement l'aire dans ce diagramme, puis en déduire la puissance fournie par le moteur sur un cycle.
- A partir de la perte de masse du brûleur, et en sachant que la combustion de l'éthanol génère 40MJ par kg, estimer le transfert thermique fourni au moteur par la source chaude sur un cycle.
- Obtenir l'ordre de grandeur du rendement de ce moteur.